



TITLE:

半導体量子細線における非平衡電流ゆらぎ (Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

西原, 禎孝

CITATION:

西原, 禎孝. 半導体量子細線における非平衡電流ゆらぎ. 京都大学, 2015, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18818>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	西原 禎孝
論文題目	半導体量子細線における非平衡電流ゆらぎ		
(論文内容の要旨)			
<p>今日、素子の微細化に伴って、既存の半導体素子とは異なる特色を持つ次世代素子の開発が盛んに行われている。これらの素子の特色は、その動作原理が電子の量子力学的な振舞いに基づいている点にあり、既存の半導体素子とは異なる取り扱いが必要となる。そこで注目されたのが電流の時間的なゆらぎである。ゆらぎには系の本質的な情報が内包されていることから、半導体素子における電子の量子輸送現象をより詳細に明らかにできると期待される。</p> <p>本研究では量子効果が特徴的に現れる量子ポイントコンタクト(QPC)を用いて、電流ゆらぎ測定による非平衡量子輸送現象の解明を目指した。具体的には、1. InGaAs QPCにおけるスピン依存伝導、2. 高移動度QPCにおけるファノ因子、3. p型QPCにおける電流ゆらぎ、の3つの実験を行った。以下に詳細を述べる。</p>			
1. InGaAs基板上に作製した量子細線におけるスピン依存伝導			
<p>本実験では、スピン軌道相互作用が強く働くことで近年注目されているInGaAsを母材料とした半導体に作製されたQPCにおいて伝導度及び電流ゆらぎ測定を行った。そして、その伝導過程がコヒーレントなものであるか検証し、さらにはそこで生じるスピン依存伝導に関してそのスピン分極率の見積もりを試みた。</p> <p>実験結果として、まず、伝導度プラトーにおける電流ゆらぎの抑制が見られた。これは透過確率が1のチャネルの形成を意味し、コヒーレントな輸送を示す直接的な証拠である。一方で、このとき得られた電流ゆらぎが理論値より大きく見積もられたことに関して、リードで生じたジュール熱がチャネルによって拡散するという電子発熱の寄与を導入して定量的に解析したところ、実験値を説明することができた。そして、この効果により素子を伝導する電子の温度が環境の温度より0.3 K高くなっていることが見積もられた。</p> <p>次に、チャネルが1本のみ存在する伝導度が低い領域において、スピン軌道相互作用とQPCのポテンシャルによって有効磁場の勾配を作り出し、スピンを選択的に透過するチャネルを形成した。そして、伝導度及び電流ゆらぎ測定からそれぞれアップとダウンの電子スピンが通るチャネルの透過確率を算出し、実際に70 %程度のスピン分極が生じていることを確認した。</p> <p>本研究によって、InGaAs QPCにおいても従来の量子輸送現象と同じ扱いができることが明らかになり、さらに電氣的にスピン分極率を見積もれることが分かった。</p>			

2. 高移動度量子細線における量子伝導

理論的にもよく理解され、多数の実験が定性的にそれを裏付けているにもかかわらず、QPCで生じる電流ゆらぎに関して理論と実験の定量的な一致が得られていない。これを詳細に検証するために、本実験では、移動度が $10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超えるQPCにおいて電流ゆらぎを測定した。この高移動度の系は非常にクリーンであり、理論がモデルに設定する理想的な系に最も近く、理論との違いを検証する上で最適と考えられる。

高移動度QPCにおいて伝導度を測定したところ、30 mKで20本にも及ぶチャンネルの形成が観察できた。次に、電流ゆらぎ測定から電子輸送を特徴付けるFano因子を導出したところ、広い伝導度の範囲にわたって高い精度で求めることができた。しかし、伝導度プラトーにおいて実験的に得られたFano因子は理論と異なりゼロではなかった。そこで、これを電子発熱のモデルを用いて解析すると、熱を拡散させるチャンネルがQPCにおけるチャンネルの数に依存していることが分かった。これはすなわち、電子発熱がQPC近傍の1次元から2次元に移り変わる際に生じている可能性を示唆しており、チャンネルとリードとの接続領域が重要な役割を果たしていることが考えられる。

3. 2次元正孔系における電流ゆらぎ測定

QPCはこれまで理論、実験の両面から多くの研究が行われてきたが、0.7伝導度異常は今なお議論が続けられている現象である。正孔は電子に比べ多体効果が顕著であるため0.7伝導度異常に関してより詳細な理解を得られると期待される。本実験では、多体効果を取り扱う際に強力なプローブとなる電流ゆらぎを測定し、0.7伝導度異常の検証及び正孔輸送に関する様々な知見を得ることを目指した。

p型のQPCにおいて伝導度測定を行ったところ、その温度依存性からは温度が上がるにつれ通常のプラトーが見えにくくなる一方、0.7伝導度異常が明瞭になっていく振舞いが見られた。また、磁場依存性からは磁場を印加するにつれ0.7から0.5のプラトーへと遷移していく様子が見られた。次に、電流ゆらぎ測定を行ったが、トップゲート電極のキャパシタンスが非常に大きくこれまでの回路モデルでは解析できなかった。したがって、電流ゆらぎを得るには新たな回路モデルを考案するなどしてこの技術的な課題を解消する必要がある。

以上の結果は、これまでよく知られたQPCという系の新たな側面である。こうした結果が得られたのは、電流だけではなく電流の分散値である電流ゆらぎに着目し、それを測定したことによる。今回得られた成果は今後の量子輸送に関する定量的な議論を深めるに当たって有用であり、したがって、本研究の果たした役割は大きい。

(論文審査の結果の要旨)

本論分は「InGaAs基板上に作製した量子細線におけるスピン依存伝導」、「高移動度量子細線における量子伝導」、「2次元正孔系における電流ゆらぎ測定」の3つの内容で構成されている。

「InGaAs基板上に作製した量子細線におけるスピン依存伝導」では、スピン依存伝導の研究舞台として注目される新規半導体であるInGaAsにおいて、従来の量子輸送の取り扱いが可能かどうか、検証が行われた。実験に際して、InGaAs基板上に量子ポイントコンタクトを作製し、そこで生じる電流ゆらぎを測定している。その結果、伝導度プラトーにおける電流ゆらぎの抑制を確認し、コヒーレントなチャネルによる量子輸送が生じていることを明らかにした。さらに、理論予測との定量的な違いについて、電子発熱の効果を考慮したモデルを導入し理論を再現している。加えて、伝導度が低い領域での電流ゆらぎの測定により、量子ポイントコンタクトで生成したスピン分極電流におけるスピン分極率の定量的な見積もりに成功している。ここでの成果は、今後、InGaAs系におけるスピン依存伝導を定量的に理解する際の指針を示したという意味で大きな意義がある。

「高移動度量子細線における量子伝導」では、高い移動度を持つ非常にクリーンな系に作製された量子ポイントコンタクトにおいて、電流ゆらぎを精密に測定し理論と定量的にどこまで一致するのか検証を行っている。結果として、高移動度の素子を用いたことで多くの伝導度プラトーの形成が見られ、そのプラトーがみられる広い伝導度領域にわたって高い精度で理論と一致する電流ゆらぎが確認された。しかしながら、プラトーにおける電流ゆらぎに関して完全に理論と定量的に一致せず、有限の電流ゆらぎが得られている。この要因について電子発熱の効果に言及しており、熱い電子による熱の拡散のモデルから発熱のメカニズムについて定量的な説明を行っている。こうした効果を余すことなく取り入れることで量子輸送に関して完全な理解が得られると期待されることから、本実験が果たした役割は大きい。

「2次元正孔系における電流ゆらぎ測定」では、正孔がキャリアである系に作製された量子ポイントコンタクトにおいて電流ゆらぎ測定を行い、多体効果に起因する量子輸送の解明を目指して実験を行っている。対象が新規材料であることや幾つかの技術的な課題のため、現在は有意な電流ゆらぎシグナルを得るまで至っていない。今後の研究の進展が待たれる。

以上のように、本研究の成果は量子輸送の定量的な理解という点で学術的に大きな意味を持ち、研究領域の発展に貢献するものといえる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年1月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降